

Magasdi Attila*, Dr. Dobránszky János*

Nagy széntartalmú acélszalagok lézersugaras hegesztése

A nagy C-tartalmú acélszalagokkal az ipari termelés számos területén mint alapanyaggal találkozhatunk. A belőlük készülő termékek száma rendkívül nagy (pl. fűrészlapok, körfűrészek, fűrészlaprugók, sodronyok stb.). Ezen acélok készülnek ötvözetlen és Cr- vagy Ni-ötvözéssel is. A szóban forgó acélszalagok számos felhasználási területen nagy mechanikai igénybevételnek vannak kitéve. Ennek következményeként a termékek élettartama korlátozott, tönkremenetelük gyakran fáradásos jellegű, bemetszések vagy hegesztett kötések mentén történő repedés, törés formájában jelentkezik. A hidegen hengerelt majd nemesített acélszalagok feldolgozására jó példa a fűrészlapgyártás. A szalagfűrészlapok a feldolgozóipar leggyakrabban használt szerszámai. Alapanyaguk jellemzően nagy C-tartalmú ötvözetlen, vagy Cr-ötvözésű acél. E szerszámok jellegzetes tönkremeneteli formája a fáradásos törés, amit a szerszámok ciklikus terhelése vált ki. Mivel a különböző tönkremeneteli formák a törések és a repedések alapján jól beazonosíthatók, felállítható a tönkremenetelek és a repedések megjelenésének okai szerinti csoportosítás. A szalagfűrészlapok esetében két helyen valószínű repedések megjelenése. Az első jellegzetes repedésképződési hely a hegesztett kötés avagy annak hőhatásövezete. Ilyenkor általában varrathiba vagy a hőhatásövezetben jelen lévő, kis alak-

változó képességű fázis okolható a fáradásos repedés kialakulásáért. A másik, a repedések megjelenése szempontjából kritikus zóna a fogtő, ahol a foggeometria feszültséggyűjtő hatása növeli a fáradásos törés kockázatát.

A hegesztéssel végtelenített fűrészlapok a vágási folyamat alatt jelentős fázisú igénybevételnek vannak kitéve. Ez a terhelés egy ismétlődő hajlító- és lüktető-húzó terhelésből tevődik össze. A hajlítóterhelés a szalagfűrészt megvezető kerekeken történő legördülésből adódik. A lüktető-húzó igénybevétel pedig a szalagfűrészt előfeszítettségének és a vágás során fellépő vágási erőnek a következménye. Üzemi, vágási körülmények között a szalag sebessége elérheti, puhább faanyagok vágása esetén, akár a 40 m/s sebességet is. Ez kétségtelenül nagy dinamikus terhelést jelent a fog számára a faanyagba történő belépéskor. Emellett a szalag egy körülfordulása alatt kétszer is hajlító igénybevételnek van kitéve a konstans előfeszítés mellett [1]. E dinamikus igénybevételek az üzemi tapasztalatok alapján leginkább a fogtövet és a hegesztett kötéset veszik igénybe. A szalagfűrészt anyagának kifáradását a fogtőnél vagy a hegesztett kötésnél jelentkező repedés jelzi, amelyet ha későn észlelnek, a szalagfűrészt szakadásához is vezethet, s ez a fokozott balesetveszély mellett nagy javítási költséget is jelent.

A szalagfűrészlapok hegesztése manapság

A faipari szalagfűrészlapok végtelenítéséhez leolvastó ellenállás-tompahegesztést, valamint az ömlesztőhegesztések közül a fogyóelektródás, védőgázos ívhegesztést használják az ipari termelésben. A fűrészlapok jellemző vastagsága 0,60–1,65 mm. A hegesztéshez az előre fogazott szalagot megfelelő hosszúságúra vágják, különösen ügyelve a vágási pozícióra, mivel az meghatározza a végtelenítés helyén a fogasztást. A hegesztéshez előkészített fűrészlap két végét előmelegítő készülékben rögzítik illesztési hézag nélkül, illetve az esetenként előforduló 2 mm-es vagy annál vastagabb fűrészlapokat 0,2 mm illesztési hézaggal. Az előmelegítő készülék (1. ábra) az összehegesztendő fűrészlapok végét – fűtött réztömbök segítségével – 400–440 °C-ra melegíti elő, mivel a szalagfűrészlapok a nagy karbon tartalom miatt hidegrepedésre különösen hajlamosak. Miután a szalag előmelegített végei elérték a kívánt hőfokot, fűzővarratokkal rögzítik a szalagot a hegesztéshez. A hegesztés minden esetben a szalagfűrészlap hátszalagja felől kezdődik. A hegesztés során alkalmazott védőgáz Ar+10% CO₂, a gyökoldal gázvédelmére tiszta

Ar-t használnak. A hegesztéshez használt hegesztőhuzal átmérője 0,8 mm, minősége pedig G3 Si1.

Mivel a szalagfűrészlapok egyik legjelentősebb fejlesztési iránya az előfeszíthetőség növelése, ezért a hegesztett kötések fejlesztése elkerülhetetlen. Az iparban jelenleg is használatos hegesztési technológia által biztosított hegesztett kötés szilárdsága és fáradással szembeni ellenálló képessége meghatározza a maximális előfeszíthetőséget. A most bemutatott kutató-fejlesztő munkát abból a szándékból kiindulva végeztük el, hogy nagyobb szilárdságot és fáradással szembeni ellenállást – és így nagyobb

előfeszíthetőséget – biztosítsunk a lézersugaras hegesztési technológia bevezetésével a szalagfűrészlapok hegesztéséhez.

A szalagfűrészlapok lézersugaras hegesztése

A lézersugaras hegesztéssel termékelényen, jól szabályozott hegesztési paraméterekkel és csekély hőbevitellel hegeszthetők a szalagfűrészlapok. A lézersugaras hegesztés során a varratba bevitt fajlagos energia csekély, de az eljárás energiasűrűsége nagy, a bevitt hő kizárólag a varrat közvetlen környezetében hasznosul, csekély hőhatásövezetet és deformációkat eredményezve [4]. A lézersugaras hegesztésnél a hegesztőanyag varratba juttatása szintén megvalósítható, amennyiben vagy az ömledékbe, vagy a lézernyalámba adagoljuk a hegesztőhuzalt. A hegesztéstechnikai problémák, melyek az eutektoidos, nemesített acélszalagok lézersugaras hegesztésénél felmerülnek, javarészt megegyeznek a fogyóelektródás ívhegesztésnél felmerülő problémákkal. Az elsődleges probléma a hidegrepedés, mely a jelenleg is használatos előmelegítéssel



1. ábra. Az előmelegítő készülék

és hegesztést követő hőkezeléssel elkerülhető. A lézersugaras hegesztési technológia miatt felmerülő másik probléma a technológia érzékenysége az illesztési hézagra. Amennyiben a keskeny varratról lemondunk és a lencserendszer defókuszálásával szélesebb ömledékfördőt hozhatunk létre, úgy elérhető, hogy akár 0,2-0,4 mm illesztési hézag mellett – ami az előmelegítés miatt elkerülhetetlen – se roskadjon meg a varrat [2]. A hegesztési technológia tervezése során az elsődleges cél az, hogy a hegesztési és a hőkezelési paramétereiket úgy hangoljuk össze, hogy azok

az optimális szilárdság mellett a legnagyobb fáradási ellenállást biztosítsák.

Vizsgálatok

A lézersugaras hegesztéssel végtelenített szalagfűrészlapok fáradási viselkedését célszerűen fázastóvizsgálattal vizsgálhatjuk, mely szinuszos húzó-lüktető terheléssel jól közelíti a hegesztett kötés üzemszerű terhelését. A fázastóvizsgálattal jól kimutathatók a fáradást legjobban befolyásoló paraméterek, úgymint az előmelegítés, a megeresztési idő és a hegesztési sebesség hatása a kötés

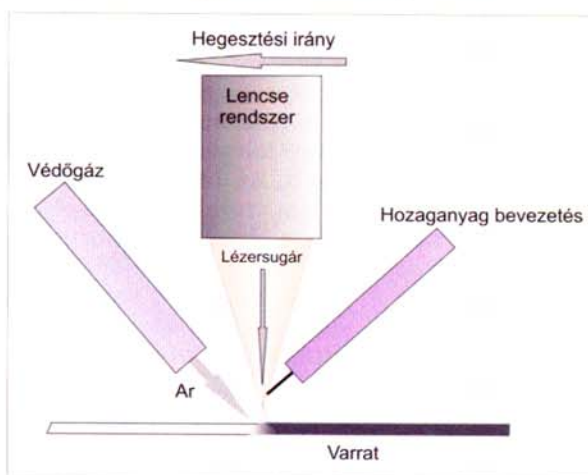
élettartamára [5]. Az iparban jelenleg is használatos, 425°C-os előmelegítés és 5 perces megeresztési időt alapul véve, és próbahegesztésekkel kikísérletezett hegesztési paramétereket alkalmazva már felállítható egy kísérleti terv a fázastóvizsgálat próbatesteinek hegesztéséhez. A kísérletekhez felhasznált C75-os szalagfűrészlap alapanyag kémiai összetétele az 1. táblázatban látható.

Az előzetes hegesztési próbák alapján meghatározott hegesztési paramétereket, melyek a teljes átvadást és megfelelő méretű varratdudort [3] biztosítanak, a 2. táblázat foglalja össze. A próbatestek hegesztéséhez a lézernyalábbba vezetett huzal került alkalmazásra. A varratot mind a korona-, mind a gyökoldalról Ar védőgáz védte az oxidációtól. Az előmelegítés miatt kialakuló, változó méretű illesztési hézag okozta varratátroszkodás – előzetes lézersugaras hegesztési próbák alapján – 2 mm átmérőjű nyalábátmérővel kiküszöbölhető. A hegesztéshez használt hegesztőfej képe és a hegesztési technológia sematikus ábrája a 2. ábrán látható.

A próbatestek hegesztéséhez választott hegesztési és hőkezelési paraméterek a 3. táblázatban láthatók.

A fázastóvizsgálathoz a próbatestek kivétele a varratokból lézersugaras vágással történt, majd mind a korona-, mind a gyökoldali varratdudor eltávolítása után a próbatestek végleges méretének megadása köszörüléssel történt.

A fázastóvizsgálat terhelési középértékének és amplitúdójának megállapításához elengedhetetlen a próbavaratok szakítószilárdságának és folyáshatárának ismerete. A mechanikai tulajdonságok ellenőrzését szakítóvizsgálattal végezve, a törés jellemzően a hőhatásövezetben következett be. Egyedül a 375°C-ra előmelegített min-



2. ábra. A lézersugaras hegesztőfej képe és sematikus elrendezése

C [%]	Si [%]	Mn [%]	S [%]	P [%]
0,76	0,35	0,65	Max.0,035	Max.0,035

1. táblázat. A felhasznált alapanyag összetétele

Hegesztési sebesség [mm/min]	P [kW]	v huzal [mm/min]	Defókuszálás [mm]	Foltátmérő [mm]	Védőgáz/gyökőgáz [l/min]
500	2	360	10	2	13/4

2. táblázat. A lézersugaras hegesztési paraméterek kiinduló értékei

Sorszám	Hőmérséklet [°C]	Megereszt. idő [min]	Hegesztési sebesség [mm/min]	P [kW]	v huzal [mm/min]	Defókuszálás [mm]	Foltátmérő [mm]	Védőgáz/gyökőgáz [l/min]
1	475	1	500	2,0	360	10	2	13/4
2	475	3	500	2,0	360	10	2	13/4
3	475	8	500	2,0	360	10	2	13/4
4	475	15	500	2,0	360	10	2	13/4
5	425	5	500	2,0	360	10	2	13/4
6	425	8	500	2,0	360	10	2	13/4
7	425	10	500	2,0	360	10	2	13/4
8	425	15	500	2,0	360	10	2	13/4
9	375	8	500	2,0	360	10	2	13/4
10	375	10	500	2,0	360	10	2	13/4
11	375	15	500	2,0	360	10	2	13/4
12	375	25	500	2,0	360	10	2	13/4

3. táblázat. Az egyes próbatestek hegesztési paramétereit

ták esetében fordult elő, hogy a próbatest a varratban szakadt. Az elkészült próbatestek mechanikai tulajdonságait a 4. táblázat mutatja be.

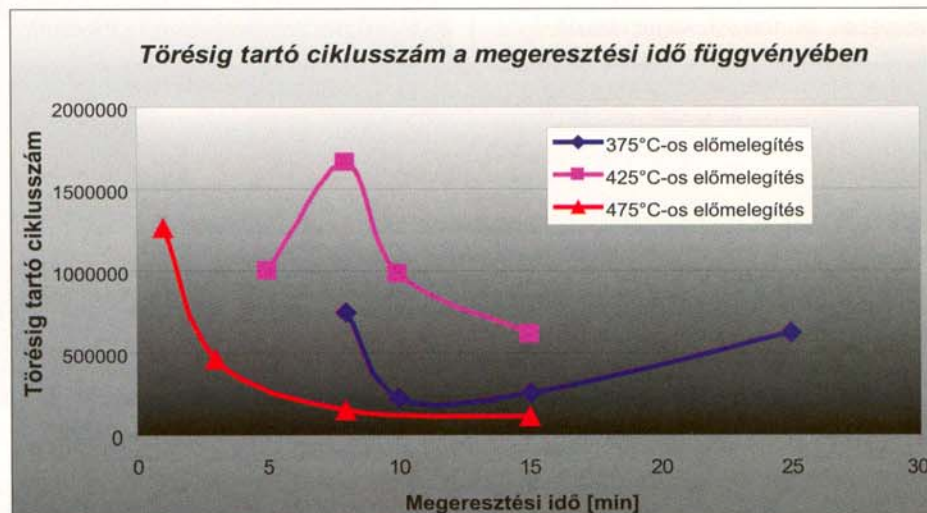
A terhelési jeleket a kísérletekhez használt MTS 810 szervohidraulikus szakítógépet saját függvénygenerátorral biztosította 25 Hz-es frekvenciával. A vizsgálati terhelés meghatározása az alapján történt, hogy a teljes terhelési tartomány a szakítóvizsgálat során mért folyáshatár felett legyen, de a maximális terhelés nagy biztonsággal ne érje el a szakítószilárdságot. Ezen megfontolások alapján középfehérítésnek a 950 MPa adódott. A terhelési amplitúdó meghatározásának határt szabott a vizsgálóberendezés szervohidraulikájának a tehetetlensége is. Így az alkalmazott fárasztó terhelés a szinuszosan lüktető, 960 ± 110 MPa volt. Mivel az egyes minták között jelentősebb folyáshatár- és szakítószilárdság-különbségek is adódtak, ezért a kezdeti terhelési programot az első 500000 ciklust követően, a 960 ± 150 MPa terhelés váltotta fel [6].

A 375°C-on előmelegített és megeresztett minták esetében a törésig tartó átlagos ciklusszám a 10 és 15 perces megeresztési idők esetében hozta a legrosszabb eredményt. A rövidebb időknél várhatóan – a varrat és a hőhatásövezet teljes elridegedése folytán – nem következhet be jelentős javulás az élettartamban, ezért a 25 percnél hosszabb megeresztési idők használata lenne indokolt. Mivel ipari termelésben már a 25 perces megeresztési idő is oly mértékben növelné a gyártási ciklusidőt, hogy az jelentős költségnövekedést okozna, ezért mindenképpen nagyobb előmelegítési hőmérsékletek alkalmazása indokolt. A törésig tartó ciklusszámok átlagát a megeresztési idő függvényében a 3. ábra mu-

tatja. A 375°C-on előmelegített, 8 perces megeresztési idejű minta metallográfiai csiszolata jól mutatja, hogy mind a varratban, mind a hőhatásövezetben fellelhető martenzit, ami ridegsége folytán könnyen repedések képződésének kiindulópontja lehet. A megeresztési idő növekedtével a martenzit elbomlik (4-5. ábra), ami a fárasztóvizsgálat eredményei szerint is elősegíti a varrat fáradással szembeni

ellenálló képességének javulását. A varratban található martenzit elbomlása jól nyomon követhető a mintákon mért keménységprofilokon is (6. ábra).

A 425°C-on előmelegített és megeresztett mintákon mért törési ciklusszámok átlaga szerint nem a jelenleg alkalmazott 5 perces megeresztési idő biztosítja, a lézersugaras hegesztéssel készült kötések esetén, a legnagyobb, fáradással



3. ábra. A mintákon mért törésig tartó ciklusszámok átlaga



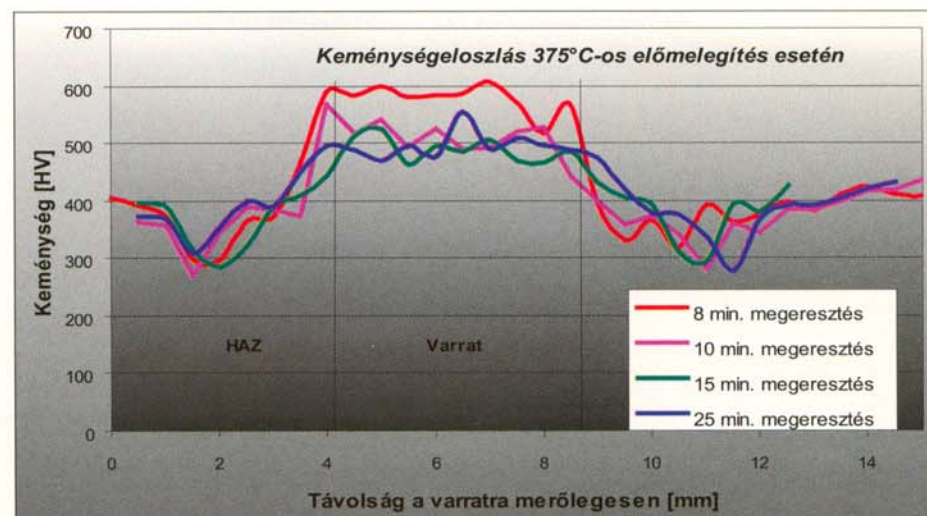
4. ábra. A 9. minta metallográfiai csiszolata



5. ábra. 12. minta metallográfiai csiszolata

Sorszám	Rm [MPa]	Rp [MPa]
1	1199	930
2	1141	825
3	1093	815
4	1055	738
5	1207	961
6	1175	939
7	1196	905
8	1200	883
9	1209	1017
10	1200	868
11	1208	982
12	1214	956

4. táblázat. Az egyes próbatestek mechanikai tulajdonságai



6. ábra. Keménységeloszlás a varrat tengelyére merőlegesen a 375°C-on előmelegített mintáknál

szembeni ellenállást, hanem a 8 perces megeresztési idővel készült mintákon mért törési ciklusszámok átlaga bizonyult a legjobb eredménynek az összes minta közül. Ez azt mutatja, hogy a jelenleg is alkalmazott 425°C-os előmelegítés megfelelő a hegesztett kötések fáradási tulajdonságainak maximalizálásához. A 425°C-os előmelegítéssel és megeresztéssel készült mintákon mért törési ciklusszámok átlaga a megeresztési idő függvényében szintén a 3. ábrán látható.

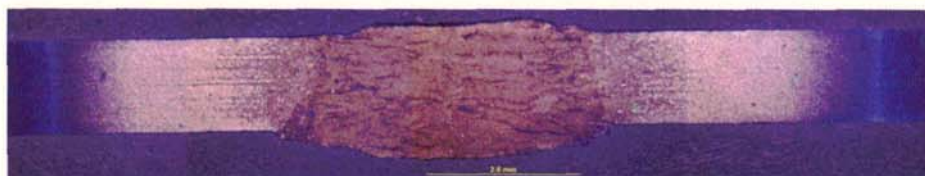
A 425°C-on előmelegített minták metallográfiai csiszolatai alapján a leghomogénebb szövetszerkezetű varrat e hőmérsékleten biztosítható. A megeresztési idő növekedtével a hőhatásövezetben jelentős mennyiségű ferrit kezd kiválni (7–8. ábra), ami bár szívóssága révén képlekeny csuklóként viselkedik terhelés hatására, de a varrat szilárdsági tulajdonságait rohamosan rontja. A mintákon mért keménységprofilok is jól tükrözik, hogy az 5 és 8 perces megeresztési idők esetén

észlelhető a legkisebb felkeményedés és kilágyulás az alapanyag keménységéhez képest (9. ábra).

A 475°C-os előmelegítéssel készült minták esetében a törési ciklusszám átlaga monoton csökkenő jelleget mutat a megeresztési idő függvényében. Az egy percnél rövidebb idejű megeresztések az ipari termelésben szintén nem javasoltak, mivel a jelenlegi technológia mellett pontos betartásuk nehezebben kivitelezhető. A 475°C-os előmelegítéssel és megeresztéssel készült mintákon mért törési ciklusszámok átlagát a megeresztési idő függvényében ugyancsak a 3. ábra mutatja. A 475°C-on előmelegített minták metallográfiai csiszolatain widmännstetten-ferrit kiválások láthatók a fúziós zóna határán, és proeutektoidos ferritkiválások a hőhatásövezetben. A 425°C-on előmelegített mintákhoz hasonlóan a hőhatásövezetben kiváló ferrit (10–11. ábra) e mintáknál is jelentősen rontja a szilárdsági tulajdonságokat, és ezzel egy időben a fáradással szembeni ellenálló képességet is. Ezt jól tükrözi a mintákon mért keménységeloszlási profil is, melyen jelentős kilágyulások észlelhetők a hőhatásövezetben (12. ábra).



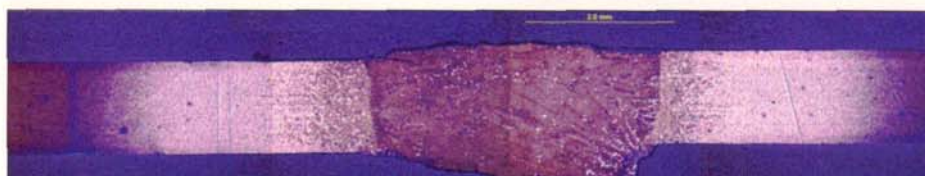
7. ábra. Az 5. minta metallográfiai csiszolata



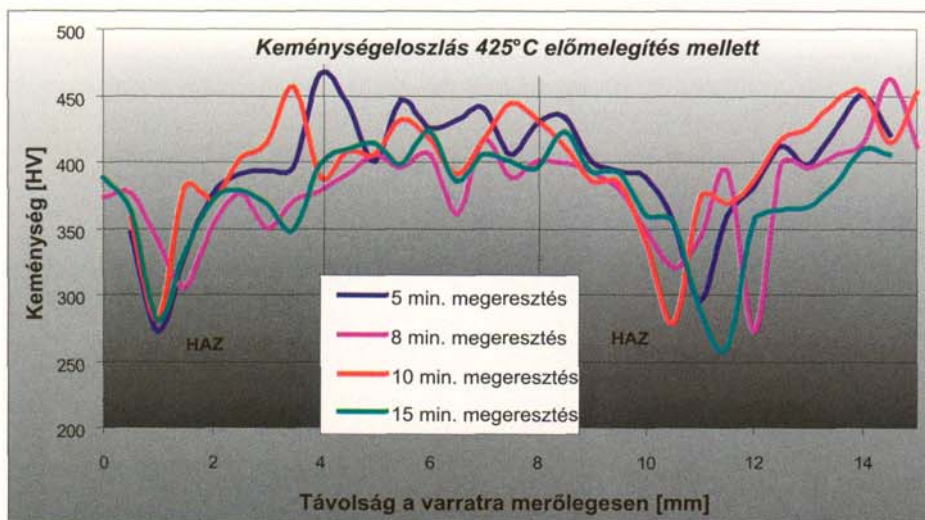
8. ábra. A 8. minta metallográfiai csiszolata



10. ábra. Az 1. minta metallográfiai csiszolata



11. ábra. A 4. minta metallográfiai csiszolata



9. ábra. Keménységeloszlás a varrat tengelyére merőlegesen mentén a 425°C-on előmelegített mintáknál

Összegzés

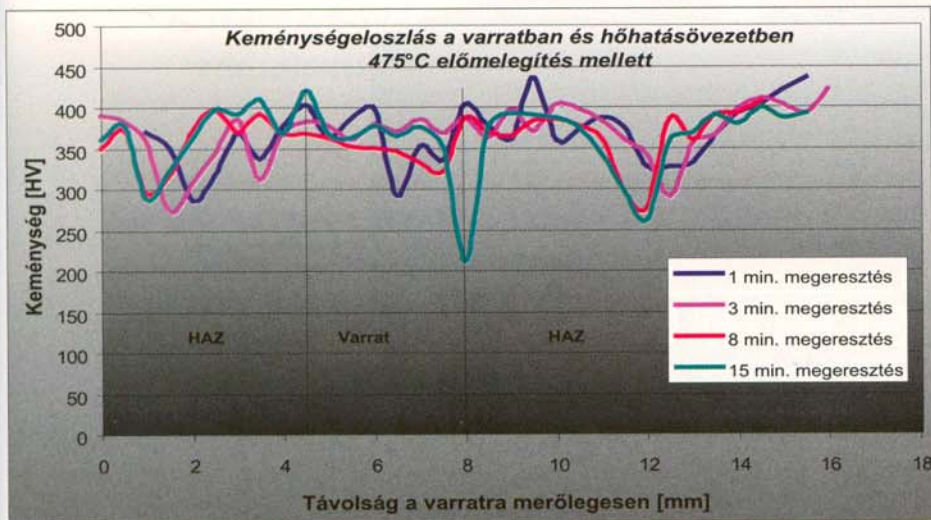
A különböző hőfokon előmelegített és megeresztett mintákon végzett vizsgálatok és a fárasztóvizsgálat eredményei közt legelősebben a keménységmérés emeli ki a kapcsolatot. A hegesztett kötések esetében, a varratban tapasztalható felkeményedés a kötés fáradási tulajdonságait negatívan befolyásolja. A vizsgált mintákon mért keménységértékek is ezt támasztják alá, ugyanis a törésig tartó legnagyobb ciklusszámot azon minták mutatták, amelyek a legkevésbé keményedtek fel az alapanyaghoz képest. A törésig tartó ciklusszám és az alapanyaghoz viszonyított felkeményedés közti kapcsolatot a 13. ábra mutatja.

A mintákon végzett előmelegítés hőmérséklete (hőfoka) és a megeresztési idő jelentősen befolyásolja a varratban, illetve a hőhatásövezetben kialakuló felkeményedést. Ezért a megfelelően megválasztott paraméterekkel biztosítani lehet a kötés maximális ellenállását kifáradással szemben. A megeresztési idő, az előmelegítési hőfok és a kialakuló maximális keménység kapcsolatát szemlélteti a 14. ábra. Az ábra alapján az alapanyag keménységéhez képest a legkisebb felkeményedést a 425°C-os előmelegítés mellett a 8–10 perces megeresztési idő garantálja, a vizsgálatok során alkalmazott hőbevitel mellett.

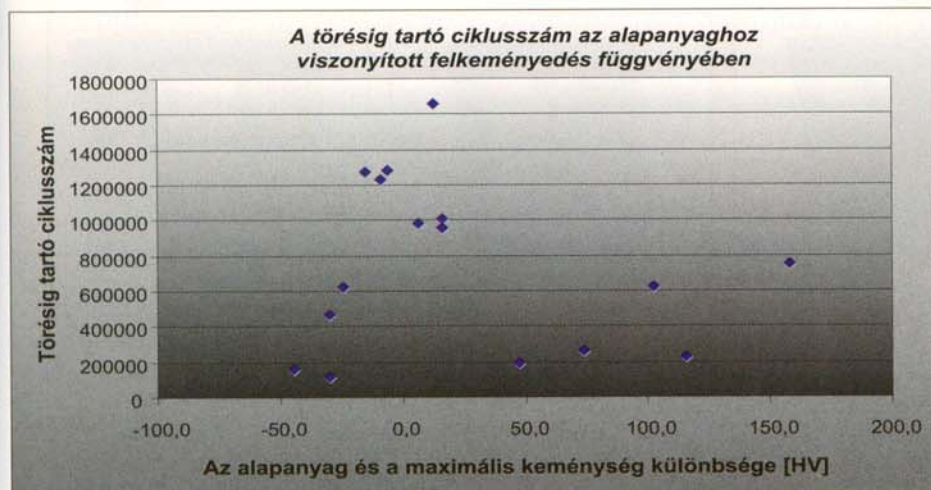
TECHNOLÓGIA – GYÁRTÁS

Hegesztési sebesség [mm/min]	P [kW]	v huzal [mm/min]	Defókuszálás [mm]	Foltátmérő [mm]	Védőgáz/gyökfgáz [l/min]	Előmelegítési hőfok [°C]	Megeresztési idő [min]
500	2	360	10	2	13/4	425	8

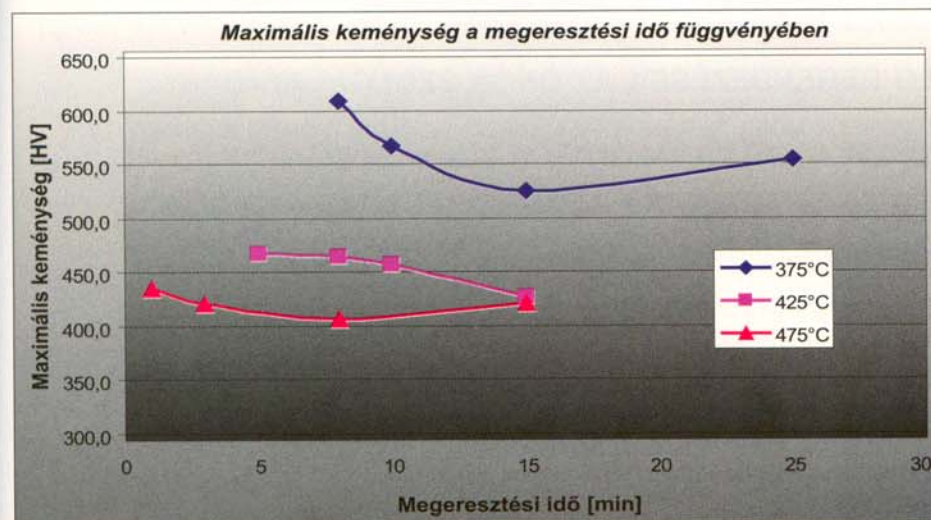
5. táblázat. A javasolt hegesztési és hőkezelési paraméterek



12. ábra. Keménységeloszlás a varrat tengelyére merőlegesen a 475°C-on előmelegített mintánál



13. ábra. A felkeményedés és a törésig tartó ciklusszám közti kapcsolat



14. ábra. A megeresztési idő és a varratban kialakuló maximális keménység kapcsolata

A próbavarratokból kimunkált mintákon végzett vizsgálatok alapján a lézersugaras hegesztés kiválóan alkalmas a nagy C-tartalmú acélszalagok tompakötéseinek hegesztésére. A vizsgálati eredmények alapján a jelenleg is használatos, 425°C-os előmelegítés adja a fárasztásnak leginkább ellenálló varratot. A megeresztési idők tekintetében az ipari termelésben alkalmazott 5 perces megeresztési idő 8 percre emelése indokolt. A hegesztési sebesség értékét a technológia adta korlátokon belül a legkisebb értéken érdemes tartani, a hőbevitel csökkentését elkerülendő a lézersugár teljesítményének arányos csökkentése mellett, a fáradási tulajdonságok maximalizálása érdekében. A javasolt hegesztési paramétereket az 5. táblázat foglalja össze.

Referenciák:

- [1] <http://www.simonds.cc/wideband/default.htm> (2008-07-21)
- [2] Z. Sun, M. Kuo: Bidding the joint gap with wire feed laser welding, *Journal of Materials Processing Technology* 87, (1999) 213-222.
- [3] K.Y. Benyounis, A.G. Olabi, M.S.J. Hashmi: Effect of laser welding parameters on the heat input and weld-bead profile, *Journal of Materials Processing Technology* 164-165, (2005), pp. 978-985.
- [4] L.P. Borrego et al.: Fatigue behavior of laser repairing welded joints, *Engineering Failure Analysis* 14, (2007) 1586-1593
- [5] J. Dobránszky, A. Magasdi, J. Ginzler: Investigation of notch sensitivity and blade breakage of bandsaw blade steels, *Materials Science Forum* Vols 473-474, (2005) pp. 79-84
- [6] M. Eibl, C.M. Sonsino, H. Kaufmann, G. Zhang: Fatigue assessment of laser welded thin sheet aluminium, *International Journal of Fatigue* 25 (2003) pp. 719-731

*Magasdi Attila, Dobránszky János
(MTA-BME
Fémtechnológiai Kutatócsoport, Budapest)